

반원형실린더 초기후류를 위한 입자와법의 하이브리드 확산기법

이 상 환[†] · 조 지 영^{*}

(2004년 1월 2일 접수, 2004년 5월 15일 심사완료)

Hybrid Diffusion Scheme of Vortex Particle Method for Early Wake Past Semicircular Cylinder

Jiyoung Cho and Sanghwan Lee

Key Words : Vortex Particle Method(입자와법), Hybrid Diffusion Scheme(하이브리드 확산기법), Semicircular Cylinder(반원형실린더), Particle Strength Exchange(입자강도교환), Random Walk(랜덤워크), Vor-tex Shedding Process(와이탈 과정)

Abstract

Unsteady behavior of the early wake in the viscous flow field past an impulsively started semicircular cylinder is studied numerically. In this paper, we propose the hybrid diffusion scheme to simulate dynamic characteristics of wake such as a fishtail-like flapping and an alternate vortex-shedding more accurately. This diffusion scheme based on particle strength exchange is mixed with the stochastic nature of random walk method. Also, the viscous splitting algorithm which calculates convective and diffusion terms successively is applied in order to handle random walk method effectively. Consequently, the early behavior of wake due to the breakdown of symmetrical vorticity balance is more practically simulated with the vortex particle method.

기호설명

Δt : 시간간격
 T^* : 무차원 시간
 \mathbf{u} : 속도벡터
 \mathbf{x} : 물체의 위치벡터
 h : 입자 사이의 간격
 K : 속도커널
 M : 패널(panel)의 개수
 Re : Reynolds 수
 γ : 와판(vortex sheet)의 강도
 ε : 입자의 코어 반경
 η : 입자와의 형상합수
 v : 동점성계수

ξ : 난수
 ω : 와도
 Γ_l : 입자의 강도(순환)
 A : 와도재배치 커널

1. 서론

실제 공학 분야에서 당면하게 되는 문제로서 급 출발하여 무딘 물체를 지나는 후류 유동에 관한 연구는 비정상 상태의 유동을 해석하여야 하는 예이다.

본 논문에서는 정지 유체가 급 출발하여 반원형 실린더를 지날 때, 비정상 유동해석에 적합한 라그랑지 방법(Lagrangian method)인 와법(vortex method)을 사용하여 수치해석을 실시하였다.

최근 입자와법은 고해상도 시뮬레이션을 위한 직접수치모사(Direct Numerical Simulations)의 한 방법으로 사용되고 있으며, 입자와법의

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
 E-mail : shlee@hanyang.ac.kr
 TEL : (02)2290-0445 FAX : (02)2290-0445

^{*} 한양대학교 대학원 기계공학과

검증문제로서 원통과 같은 단순한 형상에 대하여 선행 연구⁽¹³⁾가 있었다.

본 연구에서 반원형 실린더를 선택하게 된 것은 기하학적 특성상 양단이 예각이므로 와의 발생이 원형실린더에 비하여 활발하게 전개되고, 후류의 대칭성 붕괴가 빠르게 발생한다는 점에 착안하여, 급 출발하여 반원형 실린더를 지나는 후류 유동장의 시간 전개에 대하여 입자와법을 적용하기 위한 것이다.

급 출발하는 무딘 물체 주위의 비정상 점성 유동장에서 초기 단계에 형성된 후류 와의 구조는 물체의 중심을 기준으로 대칭적인 형태를 나타낸다. 그러나 Perry,⁽¹⁹⁾ Eaton,⁽¹¹⁾ Boisaubert⁽³⁾의 실험적인 연구 결과와 같이 무딘 물체를 지나는 비정상 점성 유동에 대하여 후류 구조의 실제적인 양상은 대칭성이 붕괴되기 시작하면서 반복적인 와이탈 과정(Alternate vortex shedding process)으로 전개되는 것을 관찰할 수 있다. 따라서, 실제 후류 유동에서 야기되는 이러한 물리적인 현상을 수치적으로 명확하게 모사하기 위해서는 점진적인 대칭성의 붕괴가 수치 계산 영역 내에서 수반되어야 한다.

본 연구는 기존의 입자와법의 적용만으로는 대칭성의 붕괴를 나타내지 못하고 있다. 따라서 본 연구는 급 출발 하는 유동장내의 대칭성 붕괴를 나타내기 위하여 새로운 확산기법을 제안하여 실제 유동장을 모사하기 위함이다.

급 출발하여 반원형 실린더를 지나는 비정상 점성유동의 초기 단계에서, 반복적인 와이탈 과정과 같은 주기적인 특성에 대한 전조로서 실린더의 근접 영역에서 시간에 따라 변화하는 후류의 구조적 양상을 실제와 근사하도록 시뮬레이션하는 것이며, 이러한 후류의 물리적인 메커니즘을 효과적으로 모사하기 위하여 새로운 확산 기법을 제안하고 이와 유사한 연구분야나 산업분야에서 그 응용의 근거를 마련하도록 하는 것이다.

따라서, 본 논문에서는 앞에서 언급한 비대칭적인 후류 전개의 물리적인 원인을 물체 표면으로부터 생성되는 와도의 불규칙한 확산이라 가정하고 이를 수치 계산 영역에서 유기하기 위한 방법으로 하이브리드 확산 기법을 제안한다.

급 출발하는 비정상 점성유동에서 유동 후류의 구조적 변화를 보다 실제적으로 모사하기 위하여 입자와법에 하이브리드 확산기법(Hybrid Diffusion Scheme; HDS)을 적용하였고, 그 타당성을 검증하기 위하여 반원형 실린더의 후류에 관한 비정상 유동 시뮬레이션을 수행하였다.

초기 단계의 후류 유동장에서 하이브리드 확산 기법으로 인하여 야기되어지는 미약한 수치

적 교란이 시간에 따른 후류의 발달에 미치는 영향은 매우 흥미로운 연구의 대상이 된다.

2. 지배방정식

점성유체의 2차원 비압축성 비정상 유동은 Navier-Stokes 방정식에 회전(curl)을 취하여 얻은 와도방정식과 연속방정식으로 정의된다.

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \omega = \nu \nabla^2 \omega \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ 는 속도, $\omega = \omega \hat{e}_z = \nabla \times \mathbf{u}$ 는 와도(Vorticity), ν 는 동점성계수(Kinematic viscosity)이며 ∇^2 는 Laplace 연산자(Laplace operator)이다.

3. 입자와법

와도방정식은 Chorin, A. J.⁽⁵⁾이 제안한 점성분할 알고리즘(Viscous splitting algorithm)에 따라 대류항의 비점성 과정과 확산항의 점성 과정으로 분리할 수 있다. 따라서, 식 (1)의 와도방정식은 식 (3)의 대류방정식과 식 (4)의 확산방정식으로 각각 구분되고 이를 부분단계 알고리즘(Fractional step algorithm)에 적용하여 계산한다.⁽¹³⁾

대류방정식:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \omega = 0 \quad (3)$$

확산방정식:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \nu \nabla^2 \omega \quad (4)$$

3.1 대류항

속도장은 포아송(Poisson) 방정식의 해에 대하여 Green 함수를 사용하는 와도장으로 결정된다.

$$\mathbf{u} = -\frac{1}{2\pi} \int \mathbf{K}(\mathbf{x}-\mathbf{y}) \times \omega \, d\mathbf{y} + \mathbf{U}_0(\mathbf{x}, t) \quad (5)$$

여기서, $\mathbf{U}_0(\mathbf{x}, t)$ 은 속도장에 대하여 불투과 경계조건(No-through-flow boundary condition)을

갖는 제차 푸아송 방정식의 해이고, \mathbf{K} 는 속도계산을 위한 합성커널(Convolution kernel)이다. 본 연구에서는 Beale & Majda⁽²⁾가 제안한 2차 속도커널을 사용하였다.

3.2 하이브리드 확산 기법

Degond & Mas-Gallic⁽¹⁰⁾에 의하여 소개된 입자강도교환법(Particle Strength Exchange Method; PSE)은 기존의 확산 기법 중 가장 좋은 정확도⁽¹⁶⁾를 갖는 것으로 알려져 있지만 유동 교란을 위한 임의의 방법을 제공하지 않는 한 수치계산영역 내에서 대칭적인 와도장으로 전개될 수 밖에 없다. 그러나, 3 차원적 간섭을 무시할 만한 실제 유동에서 조차도 유동 후류의 시간 전개는 비대칭적인 양상으로 전개되고 있다.⁽³⁾

이처럼 박리 전단층을 따라 불안정성이 유지되는 유동에 대하여 기존의 시뮬레이션 결과가 안고 있는 모순 즉, 실제 유동 후류의 구조적 양상과 시뮬레이션의 결과가 상이하게 전개되는 수치계산 방법 상의 오류를 최소화하기 위하여 하이브리드 확산 기법을 제안한다.

입자강도교환법이 갖는 장점은 주변 입자들 간의 와도 교환을 통하여 높은 정확도의 확산 성능을 보장한다는 것이지만, 이 확산 기법을 입자와법에 적용하여 비정상 유동 후류에 관한 시뮬레이션을 수행하였을 때, 시간에 따른 후류의 구조는 대칭적인 양상으로 전개될 수 밖에 없다.

그러나, 실제 유동 후류 양상이 대칭적인 형태로 전개되지 않는다는 것은 이미 선행 실험 연구를 통하여 잘 알려져 있는 바이다(Re=100; T*>3).⁽³⁾ 따라서, 물체를 지나 흐르는 후류 유동장 즉, 와도장 내의 유력한 와도 영역이 물체 주변으로부터 발달하여 후류 영역까지 확장된 수치 계산 영역에서 주변 입자들 간의 와도 교환 뿐만 아니라 와 입자들의 불규칙한 와도 수송을 포함하는 와도장의 민감한 변화를 보다 실제적으로 근사화하기 위하여 하이브리드 확산 기법을 고안하였다.

하이브리드 확산 기법은 높은 정확도를 가지고 확산방정식을 근사화하는 입자강도교환법⁽¹⁰⁾을 기반으로 하며, 여기에 Lagrangian 적 특성을 가지고 불규칙하게 와도를 운반하는 랜덤워크법(Random Walk Method; RW)⁽⁵⁾의 장점을 혼합 적용한 방법이다.

이 확산 기법은 대칭적인 후류 유동장 내에서 발생가능한 와도 불균형을 확률적인 해석에 따라 근사화하는 방법이다. 이렇게 수치 계산

영역 내에 유지되어진 와도의 불규칙한 교란 성분은 유동의 동점성계수에 종속적이기 때문에, 시간이 지남에 따라 하이브리드 확산 기법에 의하여 축적된 수치적 교란 성분은 와도 균형이 현저하게 붕괴되는 시점을 비롯하여 후류와의 비정상 거동까지도 정확하게 모사할 수 있다.

랜덤워크법은 와법에 의한 점성유동의 시뮬레이션을 목적으로 Chorin⁽⁵⁾에 의하여 소개되었으며 확산방정식의 해는 다음 적분식으로 나타낼 수 있다.

$$\omega(\mathbf{x}, t) = \int G(\mathbf{x} - \mathbf{y}, \nu t) \omega_0(\mathbf{y}) d\mathbf{y} \tag{6}$$

$$G(\mathbf{x} - \mathbf{y}, \varepsilon) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi\varepsilon})^d} e^{-|\mathbf{x}-\mathbf{y}|^2/2\varepsilon}, \tag{7}$$

$$d = 1, 2$$

여기서, G 는 확산방정식에 대한 그린 함수(Green's function)의 해이고 평균치는 0, 분산은 $\varepsilon = 2\nu\Delta t$ 이다.

하이브리드 확산 기법은 와도를 수송하는 입자들의 Brownian 운동을 모사하기 위하여 대류과정 이후에 세워진 와도장을 초기조건으로 사용하여 입자들의 위치를 불규칙하게 선택한다.

$$\mathbf{x}'_p = \mathbf{x}_p + \xi_p \tag{8}$$

여기서, ξ_p 은 가우시안 확률분포를 갖는 난수이다.⁽⁷⁾

한편, 식 (4)의 Laplace 연산자를 적분연산자로 근사화하고, 식 (8)에서 불규칙하게 교란된 입자의 위치를 적분의 구적점으로 사용하여 한 입자를 기준으로 주변 입자에 강도를 서로 교환한다.

$$\frac{d\Gamma_i}{dt} = \frac{\nu h^2}{\delta^2} \sum_{j=1}^N (\Gamma_j^{n-1} - \Gamma_i^{n-1}) \phi_\delta(\bar{x}_i - \bar{x}_j) \tag{9}$$

식 (9)는 본 연구에서 사용한 입자강도 교환법의 수치계산 식이다.

하이브리드 확산 기법은 불규칙한 입자 거동에 의한 비정렬 입자 분포를 가지고 각 입자와의 강도를 주변 입자와 교환함으로써 확산방정식을 근사화한다. 여기서 입자의 강도를 서로

교환하기 위해 요구되는 입자들 간의 코어 중첩은 수치적 교환 성분이 입자의 코어 반경에 제한적으로 충분히 만족된다.

3.3 경계조건

실린더의 후류 유동에 관한 문제에서 지배방정식을 만족하기 위해서는 유체역학적으로 점착 경계조건(No-slip boundary condition)이 만족되어야 한다. 점착 경계조건의 적용은 대류 과정과 확산 과정을 통하여 경계면에서 발생된 미끄럼 속도(Slip velocity)를 경계면에서 생성된 와도로 변환하여 만족하는 Chorin 이 제안한 와도 생성 알고리즘(Vorticity creation algorithm)⁽⁶⁾을 기반으로 한다.

$$\mathbf{v} \frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{n}} = \frac{\Delta \gamma}{\Delta t} \quad (10)$$

따라서, 물체의 경계면을 와판(Vortex sheets)으로 근사화하고 와판의 강도를 계산하기 위하여 경계요소법을 사용한다. 이 방법은 물체의 표면을 여러개의 요소로 이산화하고 그 선형방정식을 풀어서 와판의 강도를 구한다. 이렇게 계산된 와판의 강도는 확산과정에서 Δt 시간 간격 동안 유동장안으로 방출되어야 하는 총유속(Total flux)과 같다. 따라서, 식 (10)으로부터 새롭게 생성된 와도를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 Ploumhans⁽²⁰⁾가 제안한 scheme W를 적용하였다.

3.4 입자재배치

입자와법의 확산과정에서 각 입자의 강도를 서로 교환할 때, 점성에 의한 영향을 효과적으로 모사하기 위하여 입자들간의 균일한 코어 중첩이 요구된다. 그러나 Lagrangian 적 특성상 대류에 의한 입자 간격의 변형이 불가피하므로 적절한 시간 간격마다 입자의 재배치가 요구된다.

$$\tilde{\Gamma}_i(\tilde{x}_i) \approx \sum_{j=1}^M \Gamma_j(x_j) A \left(\frac{|\tilde{x}_i - x_j|}{h} \right) \quad (11)$$

입자재배치 커널은 와도장의 전체 순환과, 선형 운동량, 각운동량 보존을 만족해야 하며, 본 논문에서는 A_2 커널⁽¹³⁾과 M_4' 커널⁽⁷⁾을 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

반원형 실린더의 직경 (D), 물체의 병진속도 (U_0), 동점성계수 (ν)에 의한 레이놀즈(Reynolds) 수를 식 (12)와 같이 정의하였다.

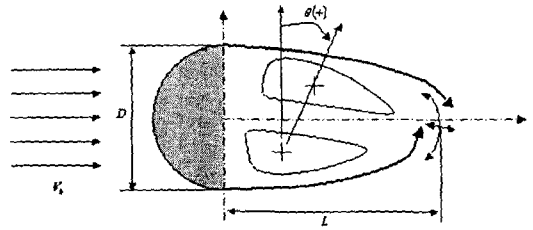


Fig. 1 Flow schematic

$$Re = \frac{U_0 D}{\nu} \quad (12)$$

시간은 식 (13)과 같이 무차원화 하였다.

$$T^* = \frac{U_0}{D} \quad (13)$$

지금까지 원통을 지나는 후류 유동에 관하여 다수의 논문이 있었으나 복잡한 물체 주변의 유동장에 관한 연구는 실험적인 측정 방법의 한계와 수치적인 계산 방법의 제약으로 인하여 거의 수행되지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 경계내에 예각을 갖는 반원형 실린더 주위의 후류 유동장에 대하여 낮은 레이놀즈 수 영역에서 시뮬레이션을 수행함으로써 재순환영역에서 와이탈 과정이 전개되기까지 어떠한 과정을 거쳐 후류 와가 형성되고 또 성장하고 변화하는지에 대하여 수치적인 방법으로 알아보았다.

본 논문에서 제안하는 하이브리드 확산 기법의 타당성을 검증하기 위하여 Boisaubert et al.⁽³⁾의 실험논문 결과와 비교하였다. 반원형 실린더를 지나는 후류 유동장에서 재순환영역의 시간에 따른 길이와 폭의 변화를 실험 결과와 비교하였고(Fig. 8, Fig. 9), 재순환영역 내에서 두 코어 중심의 이동 경로를 추적하여 그 궤적을 나타내었다(Fig. 10). 이것은 격자점에서의 값만 구할 수 있는 Eulerian 적특성과 달리 입자의 시간에 따른 위치를 알 수 있는 Lagrangian 적 특성으로부터 가능하다. 또, 이 결과를 가지고 두 에디(Eddy)의 위치 변화에 대한 상대적인 이동 각도를 계산함으로써, 후류 유동장내에서 시간에 따른 에디 중심의 위치 변화가 나타내는 유동의 미약한 주기적 성향을 실험 결과와 비교하였다(Fig. 11).

하이브리드 확산기법의 적용에 의하여 대칭적인 구조를 유지하던 재순환영역은 와도 불균형을 가속화하면서 비대칭적인 양상으로 전개된다. 결과적으로, 이 확산 기법이 초기 단계의 유동 후류

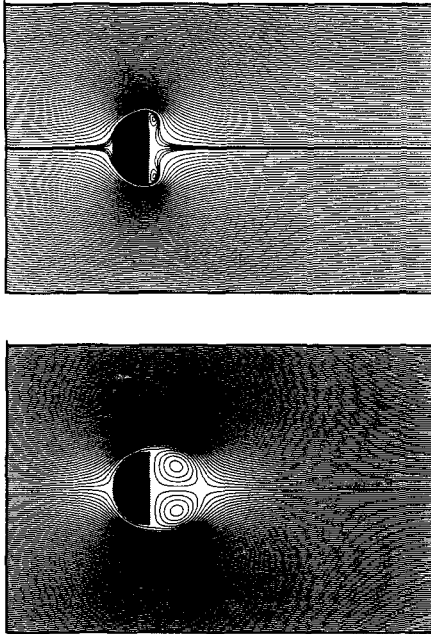


Fig. 2 Instantaneous streamline(computations) for $Re=100$ at $T^*=0.2$ (top) and at $T^*=1$ (bottom)

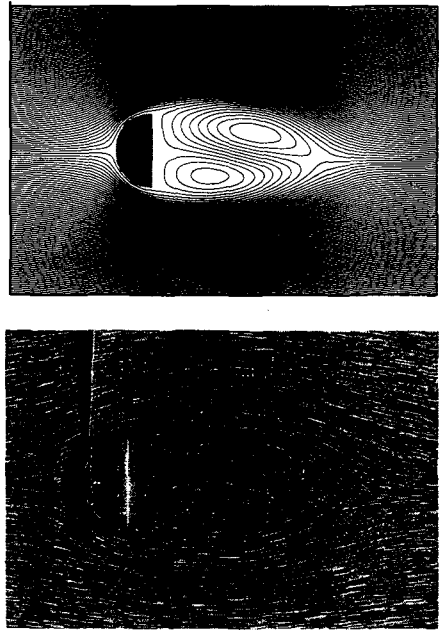


Fig. 4 Comparison of instantaneous streamline(computations;top) and flow visualization(Boisaubert et al.⁽³⁾;bottom) for $Re=100$ at $T^*=5$

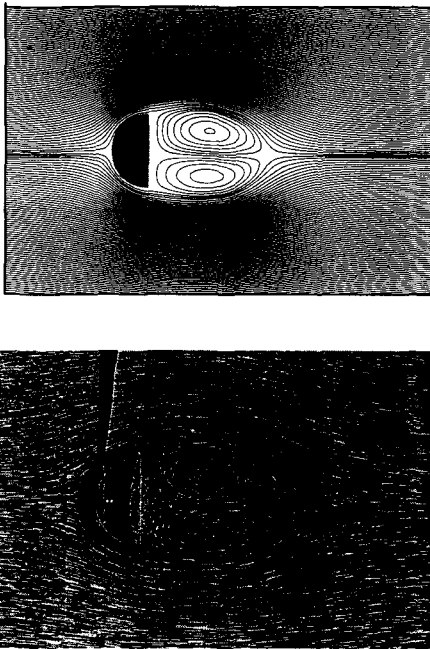


Fig. 3 Comparison of instantaneous streamline(computations;top) and flow visualization(Boisaubert et al.⁽³⁾; bottom) for $Re=100$ at $T^*=3$

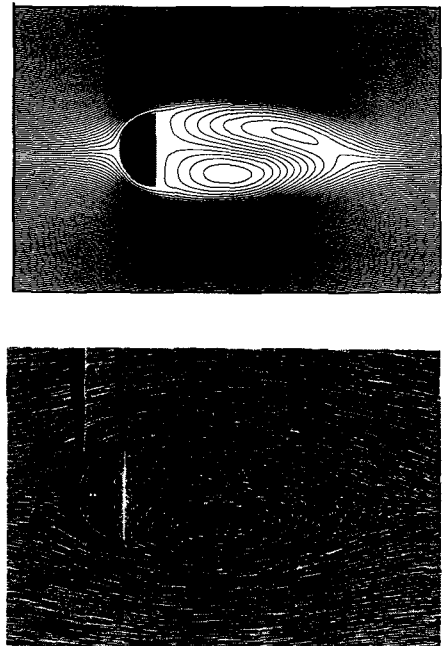


Fig. 5 Comparison of instantaneous streamline(computations;top) and flow visualization(Boisaubert et al.⁽³⁾;bottom) for $Re=100$ at $T^*=6$

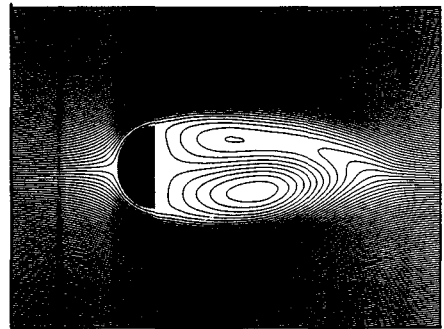
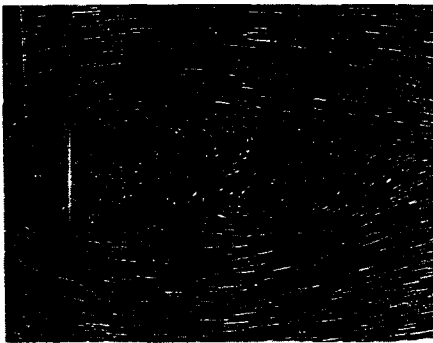
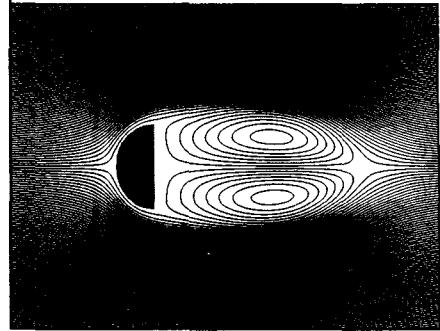
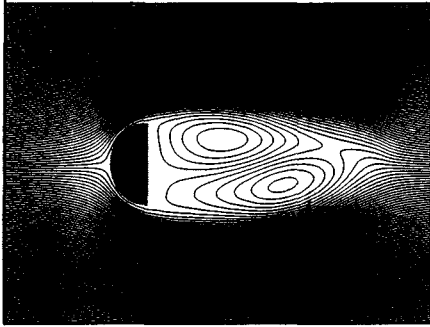


Fig. 6 Comparison of instantaneous streamline(computations;top) and flow visualization(Boisaubert et al. ⁽³⁾;bottom) for Re=100 at T*=8

Fig. 7 Comparison of instantaneous streamlines for Re=100 at T*=7 : PSE(top) and HDS(bottom)

의 와 이탈과정을 비교적 정확하게 모사하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 1 은 본 연구에서 수행한 유동장의 형태를 대략적으로 나타내었다.

4.1 대칭 와의 형성과 성장

수치해석을 실행하기 위하여 본 연구에서는 경계를 400 개의 와판으로 분리하였고, 시간간격 (Δt)를 0.01, 입자의 코어반경 (ϵ)을 0.016, 입자재배치를 위한 격자크기를 0.016 으로 하였다. 입자의 개수는 유동장의 영향을 고려하여 추가하여 계산하였다.

반원형 실린더의 후류 유동장에 입자와법을 적용하여 얻은 결과 Fig. 1 을 보면, T*=0.2 일 때 이미 반원형 실린더의 양단 뒤에서 서로 반대방향으로 회전하는 작은 에디가 대칭적으로 형성된 것을 볼 수 있다.

실험 논문⁽³⁾에 의하면 이러한 대칭적인 후류 와의 전개는 T*=3 까지 지속되고 있는데, 예상했던 것과 같이 하이브리드 확산 기법에 의한 영향은 T*=3 까지 나타나고 있지 않다(Fig. 2).

4.2 대칭성의 붕괴와 비대칭적인 후류의 전개
입자와법에 하이브리드 확산 기법을 적용했을 때, 예측하였던 후류 유동장의 대칭성의 붕괴가 T*>3 인 영역에서 서서히 드러나기 시작하였다.

T*=3 까지 잠재적으로 축적되었던 수치적 교란 성분으로 인하여 후류 유동장의 와도 균형이 급격히 붕괴되기 시작하면서 0.2<T*<3 동안 대칭적인 상태를 유지하였던 후류 와의 중심은 시간이 지남에 따라 비대칭적인 위치로 이동하게 된다.

T*=5 일 때 Fig. 3 의 하단 그림을 보면, 상부 에디의 길이와 폭은 하부 에디보다 크게 성장하였고, 중심은 하류 방향으로 이동한 것을 볼 수 있다.

또한, Fig. 3 의 상단 그림은 수치 계산한 결과로서 실험 결과와 비교하였을 때, 상부와 하부 에디의 중심 위치가 정확하게 모사되었음을 알 수 있다. 특히 상부와 하부의 유체 입자들이 합류하여 하류의 방향으로 흐르는 순방향 흐름과 에디의 순환 방향을 따라 되돌아오는 역방향 흐름을 구분하는 분기점 주위의 유동장에 대하여 정확한 시뮬레이션이 이루어지고 있는 점에 주목할 필요가 있다. 뒤에서 자세히 설명하겠지만 이것은 기존의

시뮬레이션에서 볼 수 없었던 하이브리드 확산 기법에 의한 두드러진 영향이라고 할 수 있다.

상하부 두 에디 중심의 상대적인 각이동은 대략 45° 정도를 나타내고 있다(Fig. 9).

$T^*=6$ 에서의 계산 결과는 Fig. 4 에서 보이고 있다. $T^*=5$ 일 때 상대적으로 작았던 하부 에디의 길이와 폭이 성장하면서 상부 에디가 하류의 방향으로 길게 늘어난 것을 볼 수 있고, 이와 동시에 상부 에디의 중심은 뒤로 밀려나가면서 $T^*=5$ 의 상대적인 각이동보다 더 큰 각이동을 나타낸다.

4.3 후류의 동적 특성

$T^*=8$ 에서의 결과는 후류 유동의 시뮬레이션에 관하여 하이브리드 확산 기법의 타당성을 입증하는 매우 중요한 의미를 내포하고 있다. 반원형 실린더의 후류에서 야기되어지는 물리적인 특성 즉, 초기 단계의 후류에서 전개되는 후류의 동적 메커니즘을 정확하게 모사하고 있

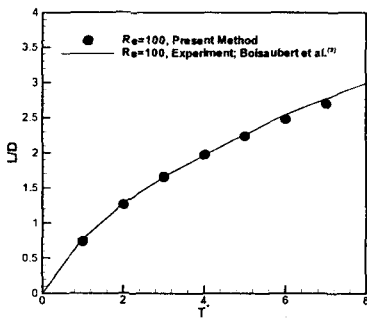


Fig. 8 Length of recirculating zone for an impulsively started rounded-forebody at $Re=100$

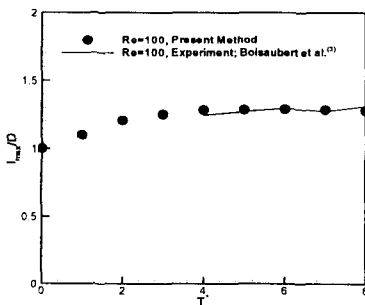


Fig. 9 Maximum width of recirculating zone for an impulsively started rounded-forebody at $Re=100$. Comparison with the experimental results

는데 $T^*=7$ 일 때의 수치계산 결과인 Fig. 7 의 하단 그림에서 보듯이 $T^*=6$ 에서 뒤로 밀려나가 있던 상부 에디의 국부적인 순환은 계속 감소하여 작아지고 하부 에디는 점점 성장하여 중심이 하류 방향으로 이동하였음을 알 수 있다.

계속해서 $T^*=8$ 일 때의 결과인 Fig. 6를 보면 상부 에디가 다시 성장하여 하부 에디를 뒤로 밀어내고 있는 양상을 나타내고 있다.

앞에서 언급한 것처럼 후류에서 이와 같은 복잡한 메커니즘을 수치적인 방법으로 정확하게 구현하기란 쉽지 않다. 수치 계산영역 내에서 유기되어진 수치적 교란이 현저하게 나타나는 시점은 교란에 의한 와도 불균형의 정량적인 부분과 맞물려 있기 때문이다. 하지만, 하이브리드 확산 기법의 특성상 유동에 따른 와도의 불규칙한 교란은 동점성계수를 포함하는 와 입자의 코어 반경에 제한적이기 때문에 교란의 정량적인 측면을 고려할 필요가 없는 장점을 가지고 있다.

Fig. 7은 확산과정에 대하여 입자강도교환법을 적용했을 때(top)와 하이브리드 확산 기법(bottom)을 적용했을 때의 결과를 비교한 것이다. 3.2 절에서 논의했던 것처럼 입자강도교환법은 유동의 교란을 위한 수치적인 방법을 제공하고 있지 않기 때문에 실제 유동과 같이 복잡한 후류의 변화를 정확하게 모사하기란 그리 쉽지가 않다.

따라서, 복잡한 유동의 후류를 보다 실제적으로 모사하기 위한 수치적 방법으로서, 본 논문에서 제안한 하이브리드 확산 기법의 사용은 수치해석 결과와 실험 결과의 비교로부터 타당함을 입증하고 있다.

4.4 결과 비교

Williamson & Prasad⁽²²⁾에 의하면, 물체 주위의 매우 가까운 영역에서 유기되어진 초기 단계의 후류 전개는 물체로부터 멀리 떨어진 영역에서 전개되는 후류의 양상을 결정하기 때문에 매우 중요하다.

Fig. 8 은 재순환영역의 시간에 따른 길이 변화를 Boisaubert et al.⁽³⁾의 실험 결과와 비교하였고, Fig. 8에서는 재순환영역의 폭을 비교하였다.

Fig. 10는 후류에서 형성된 상부와 하부 각각의 에디 중심 위치를 $T^*=1$ 간격으로 나타낸 것이다. 이 결과를 후류에서 야기되는 물리적인 특성과 연계하여 생각한다면 상부와 하부 에디가 정체하는 구간을 알 수 있다.

Fig. 11은 위 결과 Fig. 10를 가지고 상부와 하부 각각의 에디 위치에 대하여 상대적인 각도를 계산

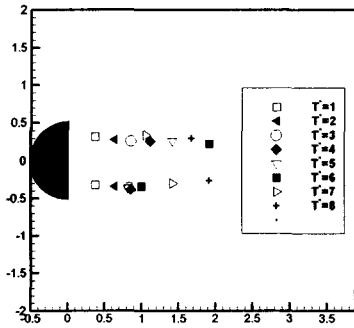


Fig. 10 Vortex-core trajectory for an impulsively started rounded-forebody at $Re=100$

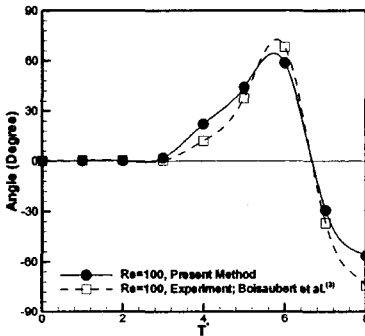


Fig. 11 The relative angular shift between the two vortex cores for an impulsively started rounded-forebody at $Re=100$. Comparison with the experimental results

하여 실험 결과와 비교한 것이다. 여기서 중요한 것은 상부와 하부의 두 에디가 하류의 방향을 따라 대칭적인 성장을 보이다가 $T^*=3$ 을 지나는 시점부터 대칭적인 양상이 붕괴되는 것을 정확하게 모사한다는 것이다.

이 결과는 실제 유동에서 물리적인 교란 성분에 의한 와도 불균형이 축적된 수치적인 교란 성분에 의한 와도 불균형과 정확하게 일치하고 있음을 보이고 있기 때문에 중요한 의미를 갖는다. 또한, 축적된 수치적 교란이 한쪽으로만 치우치지 않고 상부와 하부에서 증감을 보이며 시간에 따른 에디의 궤적까지도 근사하게 모사하고 있을 뿐만 아니라, 앞서 언급했던 후류⁽¹⁸⁾와 같은 동적 특성의 발현 시점까지도 정확하게 일치하고 있기 때문에 매우 중요한

결과라고 할 수 있다.

5. 결론

와의 대칭성 붕괴는 매우 많은 반복계산을 통한 계산오차의 축적으로 인해 예상되기도 하지만, 이러한 효과만으로는 비정상 초기거동에 대하여 정확한 와의 붕괴 시점과 이때의 거동을 모사하지는 못한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 대칭성의 붕괴를 여러 가지 변수(타임스텝, 방출와 도입방법)의 조절이 아닌 정량적인 기준에 의해 시간의 흐름에 따른 대칭성 붕괴를 하이브리드 확산기법을 도입하여 나타내고자 하였다.

입자와법을 사용하여 급 출발하는 반원형 실린더 주위의 유동해석을 수행하는데 있어서 하이브리드 확산기법을 개발, 적용함으로써 확산항을 엄밀하게 해석할 수 있는 입자강도 교환법의 장점을 유지하면서, 동시에 후류가 대칭성이 붕괴되고 반복적인 와이탈 과정으로 성장하는 현상을 성공적으로 모사할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Bar-Lev, M. and Yang, H. T., 1975, "Initial Flow Field Over an Impulsively Started Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 72, pp. 625-647.
- (2) Beale, J. T. and Majda, A., 1985, "High Order Accurate Vortex Methods with Explicit Velocity Kernels," *J. Comp. Phys.*, Vol. 58, pp. 188-208.
- (3) Boisaubert, N., Coutanceau, M. and Ehrmann, P., 1996, "Comparative Early Development of Wake Vortices Behind a Short Semicircular-Section Cylinder in Two Opposite Arrangements," *J. Fluid Mech.*, Vol. 327, pp. 73-99.
- (4) Bouard, R. and Coutanceau, M., 1980, "The Early Stage of Development of the Wake Behind an Impulsively Started Cylinder for $40 < Re < 10^4$," *J. Fluid Mech.*, Vol. 101, pp. 583-607.
- (5) Chorin, A. J., 1973, "Numerical Study of Slightly Viscous Flow," *J. Fluid Mech.* Vol. 57, pp. 785-796.
- (6) Chorin, A. J., 1978, "Vortex Sheet Approximation of Boundary Layers," *J. Comput. Phys.*, Vol. 27, pp. 428-442.
- (7) Cottet, G.-H. and Koumoutsakos, P., 2000, *Vortex Methods*, Cambridge University Press.
- (8) Coutanceau, M. and Bouard, R., 1977, "Experimental Determination of the Main Features of the Viscous Flow in the Wake of a Circular Cylinder in Uniform Translation. Part 1. Steady Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 79, pp. 231-256.

- (9) Coutanceau, M. and Bouard, R., 1977, "Experimental Determination of the Main Features of the Viscous Flow in the Wake of a Circular Cylinder in Uniform Translation. Part 1. Unsteady Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 79, pp. 257~272.
- (10) Degond, P. and Mas-Gallic, S., 1989, "The Weighted Particle Method for Convection-Diffusion Equations, Part I : The Case of an Isotropic Viscosity, Part II : the Anisotropic Case," *Math. Comp.* Vol. 53, pp. 485~526.
- (11) Eaton, B. E., 1987, "Analysis of Laminar Vortex Shedding Behind a Circular Cylinder by Computer-Aided Flow Visualization," *J. Fluid Mech.*, Vol. 180, pp. 117~145.
- (12) Kida, T., Nagata, T. and Nakajima, T., "Far-Field Condition of Vortex Methods on an Impulsively Started Two-Dimensional Circular Cylinder with Rotation," *Phys. Fluids.*, Vol. 6, pp. 2745~2756.
- (13) Koumoutsakos, P., 1993, "Direct Numerical Simulations of Unsteady Separated Flows Using Vortex Methods," *Ph. D. thesis*, Caltech.
- (14) Koumoutsakos, P. and Leonard, A., 1995, "High-Resolution Simulations of the Flow Around an Impulsively Started Cylinder Using Vortex Methods," *J. Fluid Mech.*, Vol. 296, pp. 1~38.
- (15) Koumoutsakos, P. and Shiels, D., 1996, "Simulations of the Viscous Flow Normal to an Impulsively Started and Uniformly Accelerated Flat Plate," *J. Fluid Mech.*, Vol. 328, pp. 177~227.
- (16) Lee, S.H. and Jin, D.S., 2002, "Comparisons of Two Viscous Models for Vortex Methods in Parallel Computation," *JSME. Int. J. B-Fluid. T.*, Vol. 45, pp. 231~239.
- (17) Leonard, A., 1980, "Vortex Methods for Flow Simulation," *J. of Comput. Phys.* Vol. 37, pp. 289~335.
- (18) Naudascher, E. and Rockwell, D., 1994, *Flow-induced vibrations: an engineering guide*, Vol. 7, in Hydraulic structures design manual, A.A. Balkema, Rotterdam.
- (19) Perry, A. E., Chong, M. S. and Lim, T. T., 1982, "The Vortex-Shedding Process Behind Two-Dimensional Bluff Bodies," *J. Fluid Mech.*, Vol. 116, pp. 77~90.
- (20) Ploumhans, P., Winckelmans, G. S. and Salmon, J. K., 1999, "Vortex Particles and Tree Codes: I. Flows with Arbitrary Crossing Between Solid Boundaries and Particle Redistribution Lattice; II. Vortex Ring Encountering a Plane at an Angle," In *electronic Proc. Third International Workshop on Vortex Flows and Related Numerical Methods, Toulouse, August 24-27, ESAIM*, Vol. 7, pp. 335~348.
- (21) Ploumhans, P. and Winckelmans, G. S., 2000, "Vortex Methods for High-Resolution Simulations of Viscous Flow Past Bluff Bodies of General Geometry," *J. Comp. Phys.*, Vol. 165, pp. 354~406.
- (22) Williamson, C.H.K. and Prasad, A., 1993, "A New Mechanism for Oblique Wave Resonance in the 'Natural' far Wake," *J. Fluid Mech.*, Vol. 256, pp. 269~313.
- (23) Jin, D.S., Lee, S.H. and Lee, J.H., 2000, "Simulation of the Unsteady Viscous Flow Around an Impulsively Started Cylinder Using Improved Vortex Particle Method," *Trans. KSME*, Vol. 25, No. 5, pp. 733~743.
- (24) Cho, J.Y., Lee, S.H. and Jin, D.S., 2002, "Simulations of the Early Wake Behavior Induced by an Impulsively Started a Semicircular Cylinder," *proc. The second national congress on fluids eng 2002*, pp. 349~352.